第 37 卷第 7 期 生 态 学 报 Vol.37,No.7
2017 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201511242372

陆晓辉,丁贵杰,陆德辉.人工调控措施下马尾松凋落叶化学质量变化及与分解速率的关系.生态学报,2017,37(7):2325-2333.

Lu X H, Ding G J, Lu D H.Impact of different control measures on leaf litter chemical quality dynamic and its relations with decomposition rate under the pure Pinus massoniana forest.Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2325-2333.

人工调控措施下马尾松凋落叶化学质量变化及与分解速率的关系

陆晓辉[1,2],丁贵杰[1,*],陆德辉[1]

1 贵州大学贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳 550025

2 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

摘要:马尾松凋落叶分解缓慢,促进其凋落物分解,提高养分归还速度,维持地力稳定,已成为马尾松人工林可持续经营中的关键问题。基于此,采用正交试验 $L_9(3^4)$ 设计,选择菌剂、表面活性剂、不同碳氮营养液和有机肥料 4 种人工调控因素,在马尾松林下开展凋落叶分解调控试验,以掌握不同调控组合对凋落叶分解速率和化学质量的影响及作用效果等。结果表明:有机肥料和菌剂显著影响马尾松凋落叶分解速率,腐解剂 2 和鸡粪联合作用更利于分解。马尾松凋落叶在林下自然分解过程中,化学质量参数向着利于分解的方向变化,N、P 以积累为主,C/N、C/P、L/N和 L/P 呈降低态势,人为调控措施加速了这一变化进程;不同调控措施对凋落叶化学质量参数的影响不尽相同,添加有机肥料有利于剩余凋落叶 N、P 含量升高,C/N、C/P、L/N和 L/P 的降低;菌剂腐解剂 2 有利于 L/P、C/P 的降低;表面活性剂 OP-10 有利于凋落叶L/N的降低。人工调控下,调控因素可通过改变凋落物化学质量影响其分解速率, N 含量和 C/N 是影响马尾松凋落叶分解速率的主要因素;而 P 浓度、L/N、C/P、L/P 对分解速率的影响不规律或不显著。

关键词:不同调控因素;分解;凋落叶;化学质量;马尾松

Impact of different control measures on leaf litter chemical quality dynamic and its relations with decomposition rate under the pure Pinus massoniana forest

LU Xiaohui[1,2], DING Guijie[1,*], LU Dehui[1]

1 *Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou*, *Guizhou University*, *Guiyang* 550025, *China*

2 *School of Geographic and Environmental Sciences*, *Guizhou Normal University*, *Guiyang* 550001, *China*

Abstract: The slow decomposition rate of *Pinus massoniana* litter is an important problem that results in the nutrient imbalance of soil of *P. massoniana* forests. Accelerating the nutrient return rate to soil is considered to be an efficient measure to maintain the stability of soil productivity and sustainable management. The aim of this study was to observe the chemical quality change of litter and decomposition rate by altering the decomposition conditions and to assess the effect of different additives on the decomposition rate of *P. massoniana* litter in field. The regulation factors were microbial inoculants (fungus 1 or microorganisms 1 or microorganisms 2), surface-active agents (Tween 80 or OP-10), carbon and different forms of nitrogen nutrient solution ($NaNO_3$ or urea or NH_4Cl) and organic fertilizer (chicken manure or oil cake). The experiment was designed using the orthogonal test method of $L_9(3^4)$. The results indicated that the decomposition rate of *P. massoniana* litter was influenced significantly by organic fertilizer and microbial inoculants and was fastest under the

基金项目:国家科技支撑项目(2015BAD09B01);贵州省科技重大专项(黔科合重大专项字[2012]6001 号);贵州省林业重大专项(黔林科合[2010]重大 03 号);国家自然科学基金项目(41261058)

收稿日期:2015-11-24; **网络出版日期**:2016-08-30

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gjdinggzu@126.com

combined treatment of microorganisms 2 and chicken manure. Under natural conditions, nitrogen and phosphorus would be relatively concentrated in the debris, whereas the ratios of C/N, C/P, lignin/N (L/N) and lignin/P (L/P) would decrease with the decomposition process; this is helpful in terms of accelerating the decomposition rate. Based on this principle, additives could speed up this process according to this principle. The effects of the different additives varied considerably. After the addition of organic fertilizer, the concentrations of nitrogen and phosphorous were raised, and the ratios of C/N, C/P, lignin/N (L/N) and lignin/P (L/P) were reduced. The addition of microbial inoculants resulted in lower C/P and L/P ratios; surface-active agents could help lower the L/N ratio of debris. The litter decomposition rate in all control treatments positively correlated with N concentration and negatively with the C/N ratio, and the leaf litter decomposition rate was not obviously related to its P content, L/N ratio, C/P ratio, and L/P ratio. Under artificial control, the decomposition rate can be affected by changing the litter chemical quality; the N content and C/N ratio were the main factors involved in regulating litter decomposition. The results of the study will provide the theoretical basis and technical support for *P. massoniana* forest resource management.

Key Words: different control measures; decomposition; litter chemical quality; Pinus massoniana

森林凋落物是森林生态系统内物质循环和能量流动的重要环节[1]。凋落物分解的快慢及其养分释放的多少,决定了森林生态系统养分过程的特征,也决定了土壤中有效养分的供应状况,进而影响植物的养分吸收[2]。

在较小尺度范围内,森林新鲜凋落物的物理和化学性质对凋落物分解起主要作用,表现出分解特征和分解速率上的差异[3-5], 其中 N、P、木质素、纤维素、C/N、C/P、木质素/N 等是常见的凋落物化学质量参数[6]。随着对凋落物化学属性与凋落物分解关系认识的不断深入,一些学者尝试采用人为改变基质质量的措施影响凋落物分解,如添加氮、磷进行基质养分调控[7-10];接种一定功能型真菌或复合菌剂研究对凋落物分解的影响[11-13];将具有不同基质质量的凋落物混合以影响凋落物的分解进程[14-15]。以上人为调控凋落物分解速度的研究多采用单一调控方法,而采用多因素综合调控的研究尚鲜有报道。

马尾松(*Pinus massoniana*)是中国南方最主要用材树种之一,具有分布广、速生、丰产、适应能力强、综合利用程度高等特点。马尾松针叶多为厚革质,角质层发达,含有较多的木质素、纤维素、单宁等物质,阻碍了微生物的分解,也不利于淋溶作用和土壤动物的机械破坏[16],导致松针分解缓慢。因此,促进马尾松凋落物加快分解,提高养分归还速度,维持地力稳定,已成为马尾松人工林可持续经营过程中的关键问题。为此,针对马尾松凋落叶难于分解的特性,选择不同的调控因素(菌剂、表面活性剂、碳氮营养液和有机肥料),在马尾松林下开展凋落叶分解定位试验,以比较不同调控措施对凋落叶分解速率和化学质量变化的影响,分析分解速率与凋落叶质量动态变化的关系,探讨多种调控因素干预凋落物分解的作用效果及作用途径,为科学合理经营马尾松人工林提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于贵州大学南校区松林坡马尾松林内(26°34′N,106°42′E,海拔 1110m),属于亚热带季风湿润气候,年均气温 15℃,年均降水量 1178.1mm,年均日照 1354h,无霜期 270 d 左右。土壤为第四纪红色黏土发育的黄壤。

试验地林龄 50a,林分密度 600 株/hm^2,平均胸径 42.3cm,平均高 31.6m。灌木层主要有油茶(*Camellia oleifera*)、绒毛山胡椒(*Lindera nacusua*)、南方荚蒾(*Viburnum fordiae*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、中型冬青(*Ilex intermedia*)等,草本主要有红盖鳞毛蕨(*Dryopteris erythrosora*)、寒莓(*Rubus buergeri*)、苔草属某种(*Carex* sp.)、小果葡萄(*Vitis balanseana*)、三穗薹草(*Carex tristachya*)、沿阶草

(*Ophiopogon bodinieri*)等。

1.2　试验材料

试验所用松针为当年凋落,收集于贵州龙里林场同一片马尾松中龄林。将收集的原状松针带回实验室,剔除树枝、树皮、灌木叶片等杂物,保留外形完整未分解状态的松针。将松针用自来水快速冲洗,沥水后置于50℃烘箱内烘干,密封保存备用。

1.3　试验设计及方法

针对影响和限制马尾松凋落叶分解的主要因素,采用 $L_9(3^4)$ 正交设计,选择菌剂(A)、表面活性剂(B)、碳氮营养液(C)和有机肥料(D)4 个调控因素,每个因素设 3 个水平,正交试验设计见表 1。

表 1　凋落叶分解正交试验设计

Table 1　Orthogonal test design of leaf litter decomposition

试验号 Test number	菌剂(A) Microbial inoculants	表面活性剂(B) Surface active agent	碳氮营养液(C) Carbon and nitrogen nutrient solution	有机肥料(D) Organic fertilizer	试验组合 Test combination
1	1(菌 1)	1(未处理)	1($NaNO_3$)	1(未添加)	$A_1B_1C_1D_1$
2	1(菌 1)	2(Tween 80)	2(尿素)	2(鸡粪)	$A_1B_2C_2D_2$
3	1(菌 1)	3(OP-10)	3(NH_4Cl)	3(油枯)	$A_1B_3C_3D_3$
4	2(腐解剂 1)	1(未处理)	2(尿素)	3(油枯)	$A_2B_1C_2D_3$
5	2(腐解剂 1)	2(Tween 80)	3(NH_4Cl)	1(未添加)	$A_2B_2C_3D_1$
6	2(腐解剂 1)	3(OP-10)	1($NaNO_3$)	2(鸡粪)	$A_2B_3C_1D_2$
7	3(腐解剂 2)	1(未处理)	3(NH_4Cl)	2(鸡粪)	$A_3B_1C_3D_2$
8	3(腐解剂 2)	2(Tween 80)	1($NaNO_3$)	3(油枯)	$A_3B_2C_1D_3$
9	3(腐解剂 2)	3(OP-10)	2(尿素)	1(未添加)	$A_3B_3C_2D_1$

4 种调控因素的选择原因、基本情况及处理计量如下:微生物是凋落物分解的主要参与者,本研究接种不同种类的功能型菌剂(菌 1 为淡紫紫霉(*Purpureocillium lilacinum*),分离纯化于马尾松林下枯枝落叶层;腐解剂 1 为广州微元生物科技有限公司生产的'粗纤维降解菌';腐解剂 2 为北京正农农业科技有限公司出品的'有机栽培基质发酵菌种'),以提高分解者的数量和质量;菌 1 按松针重 100%添加,腐解剂 1 和腐解剂 2 按松针重 50%添加。松针角质层发达,表面活性剂具有的软化蜡质的功效,采用表面活性剂(Tween 80 和 OP-10)预处理凋落叶,以期破坏其蜡质层;处理方法是将两种表面活性剂配制成浓度为 4 g/L 的溶液,将松针浸泡其中,24 小时后取出,用自来水反复快速冲洗,沥水后置于 50℃烘箱内烘干,密封保存备用。为保障添加菌剂的生长繁殖,每月每袋喷施不同形态氮的碳氮营养液 30mL,同时也可比较不同形态氮的作用差异;碳氮营养液以溶液中葡萄糖浓度 20 g/L 为标准,选择 $NaNO_3$、尿素和 NH_4Cl 3 种 N 素,与葡萄糖配制成 C/N 为 20 的碳氮营养液。松针 C/N 高(C/N 为 85.37),添加鸡粪(C/N 为 6.25)和油枯(C/N 为 7.13)两种有机肥料,以降低松针 C/N 比;两种有机肥料均购买自贵阳市花鸟市场,按有机肥料和松针混合 C/N 为 20 添加。

选取规格 25cm×15cm,孔径 1mm 分解袋,装入 20g 烘干松针,平铺开,扎好袋口。按试验设计安排试验,分别将各试验组 12 个分解袋集中平铺于试验地半分解层上,相邻分解袋间隔 2—3cm,不同试验组间隔 1m 以上。同时设置对照(CK),不添加任何物料,每月在分解袋上喷洒 30mL 的水。每月采样 1 次,共收集 6 次。采集后立即用自封袋封装,带回实验室,去除袋外杂质和袋内添加物料,剩余松针置于 50℃烘箱中烘干,称重,备用。

1.4　化学分析

全碳、全氮:使用德国 vario MACRO cube 常量元素分析仪测定;全磷:硝酸-高氯酸消煮,钼锑抗比色法分析(LY/T1270—1999);木质素:基于范氏(Van Soest)[17]原理,意大利 VELPFIWE 纤维素测定仪分析酸性洗涤

木质素。

1.5 数据处理与统计分析

凋落物失重率:

$$L_i(\%) = 100\times(M_i - M_0)/M_0$$

式中,L_i为凋落物失重率(%);M_0为凋落物初始重(g); M_i为不同时间点采样的瞬时残留量(g)。

凋落物分解模型及分解系数[18]:

采用改进的 Olson 经典指数模型:

$$y = ae^{-kt}$$

式中,y 为凋落物残留率(%);k 为分解系数($g\ g^{-1}\ a^{-1}$);t 为时间(a);a 为拟合参数;e 为自然对数底。

运用 Excel 2010 软件进行正交试验设计方差分析和直观分析,比较不同调控措施对分解系数的影响;运用 SPSS 19.0 软件进行多因素方差分析(general linear model)和多重比较(LSD),探讨不同调控措施对剩余凋落叶质量的影响,并通过一元线性回归(linear regression)分析讨论凋落叶失重率与剩余松针质量动态的关系。显著性水平设定为 $P=0.05$。

2 结果与分析

2.1 凋落叶分解动态及差异性分析

各试验组凋落叶质量损失率见图 1,随分解时间延长,各组凋落叶质量损失率逐渐增加;分解 6 个月后,各组累积质量损失率大小顺序为:7>9>1>6>CK>2>8>4>3>5,第 7 组的累积失重率最大 52.8%,较 CK 增加 19.86%。

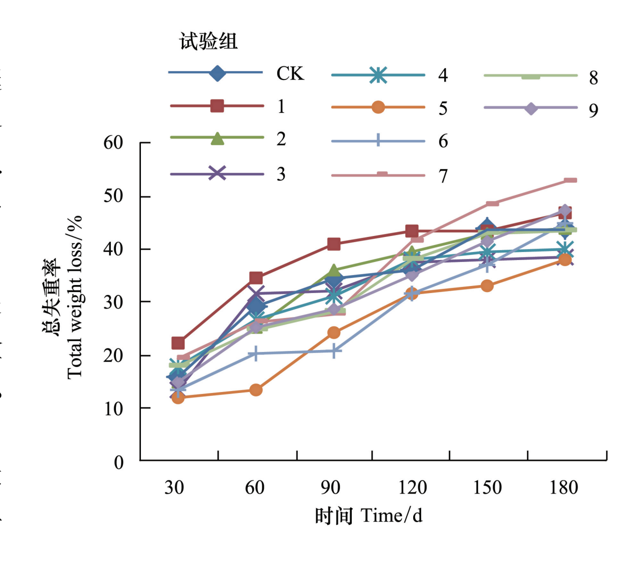


图 1 不同试验组凋落叶分解动态

Fig.1 Litter leaf decomposition dynamic on different trial groups

试验号 1—9 见表 1

选用 Olson 经典分解模型,利用各试验组凋落叶失重率动态变化过程数据,拟合的分解方程见表 2。经检验各方程均达显著或极显著水平。各组分解系数大小顺序为:7>9>6>2>8>CK>5>1>4>3。50%分解时间上,第 1、2、7 和 9 组用时低于 CK;95%分解时间上,则为第 2、6、7、8 和 9 组用时低于 CK;半分解和 95%分解用时最短的均为第 7 组,分别为 0.46a 和 2.14a,所用时间比 CK 分别缩短了 0.12a 和 0.88a。对各组凋落叶分解系数方差分析(表 3)表明:菌剂和有机肥料对凋落叶分解系数影响很大,差异显著;直观分析,菌剂和有机肥料分别以第 3 水平(腐解剂 2)和第 2 水平(鸡粪)最佳。

2.2 剩余凋落叶化学质量动态及差异性分析

由图 2 可知,在自然分解的 180d 里,CK 剩余凋落叶 N、P 含量总体呈升高趋势,在 90d 和 120d 时有所降低,但仍高于初始值(120d 时 P 含量除外)。各调控组的 N 含量总体呈升高的变化趋势,P 含量也呈现升高趋势,波动较大;绝大部分试验组剩余凋落叶 N 含量和 P 含量均高于 CK,在 90 和 120d 时表现更为突出。

CK 剩余凋落叶 C/N、C/P、木质素/N (L/N)和木质素/P (L/P),均呈“降-升-降”的变化规律,仍保持着较高的数值。其中,C/N 在所有时段均低于初始值,C/P 在 120d 时高于初始状态,L/N和 L/P 则在 90d 和 120d 时高于初始值。各调控组剩余凋落叶以上 4 个参数,在分解的 30—60d 相对于初始值明显降低,之后变化有所起伏,绝大部分低于 CK (图 2)。

表 2　不同试验组凋落物分解方程及分解参数

Table 2　Olson equation and coefficients of leaf litter decomposition on different trial groups

试验号 Test number	分解方程 Olson equation	相关系数 Correlation coefficient	显著性 P Significance P	分解系数 k Decomposition constant k	50%分解/a Half-life	95%分解/a 95% decomposition
CK	$y = 86.059e^{-0.94t}$	0.963	0.022	0.940	0.58	3.03
1	$y = 77.283e^{-0.813t}$	0.926	0.008	0.813	0.54	3.37
2	$y = 88.019e^{-1.007t}$	0.959	0.002	1.007	0.56	2.85
3	$y = 83.205e^{-0.706t}$	0.859	0.028	0.706	0.72	3.98
4	$y = 84.574e^{-0.777t}$	0.958	0.003	0.777	0.68	3.64
5	$y = 96.033e^{-0.891t}$	0.976	0.001	0.891	0.73	3.32
6	$y = 96.967e^{-1.06t}$	0.978	0.001	1.060	0.62	2.80
7	$y = 93.486e^{-1.361t}$	0.980	0.001	1.361	0.46	2.15
8	$y = 88.596e^{-0.968t}$	0.979	0.001	0.968	0.59	2.97
9	$y = 92.49e^{-1.101t}$	0.996	0.000	1.101	0.56	2.65

表 3　基于不同调控因素的凋落叶分解系数方差分析

Table 3　Variance analysis of decomposition constant on different control measures

指标 Indicators	统计值 Statistics	因素 Factors				优方案 Optimal solution
		A	B	C	D	
分解系数 Decomposition constant	F 值	75.00*	1.00	1.00	81.50*	A_3D_2
	K_1	2.53	2.95	2.84	2.81	
	K_2	2.73	2.87	2.89	3.43	
	K_3	3.43	2.87	2.96	2.45	

$F_{0.05}(2,2)= 19.00$, $F_{0.01}(2,2)= 99.00$; K_i表示水平号为 i 的对应试验结果之和

对表 4 中 6 项质量参数按正交试验设计方差分析方法进行分析,结果表明:有机肥料和菌剂对剩余凋落叶 N 浓度均有显著影响,多重比较发现,加入鸡粪和油枯有利于 N 含量升高,但二者间差异不显著;菌 1 提高 N 含量的效果好于另外两个水平。有机肥料对剩余凋落叶 P 含量具有极显著影响,水平间差异显著,加入鸡粪和油枯有利于 P 含量升高,且鸡粪影响强于油枯。有机肥料对剩余凋落叶 C/N、C/P、L/N和 L/P 均产生了显著影响,添加鸡粪和油枯均有利于 4 个质量参数降低,且鸡粪对 L/P 的影响强于油枯,二者对其他 3 个质量参数的影响无差异;表面活性剂对剩余凋落叶的L/N产生了显著影响,OP-10 较 Tween80 利于L/N降低;菌剂对剩余凋落叶 C/P 和 L/P 产生了显著影响,腐解剂 2 有利于 C/P 和 L/P 值降低。

表 4　基于不同调控因素的剩余凋落叶质量参数方差分析

Table 4　Multi-factor analysis of variance on leaf litter quality based on different control measures

质量参数 Litter quality	统计值 Statistics	因素 Factors				质量参数 Litter quality	统计值 Statistics	因素 Factors			
		A	B	C	D			A	B	C	D
N 含量	P	0.035*	0.139	0.460	0.001*	P 含量	P	0.061	0.476	0.741	0.000*
Nitrogen	水平 1	12.46a	11.61a	11.93a	10.64b	Phosphorus	水平 1	0.8577a	0.9198a	0.8255a	0.6134c
content	水平 2	11.28b	11.29a	11.85a	11.97a	content	水平 2	0.7370a	0.8065a	0.8963a	1.0742a
	水平 3	11.42b	12.25a	11.37a	12.54a		水平 3	0.9696a	0.8379a	0.8426a	0.8766b
C/N 比	P	0.454	0.186	0.144	0.000*	C/P 比	P	0.047*	0.134	0.150	0.000*
C/N ratio	水平 1	37.86a	39.38a	37.82a	43.64b	C/P ratio	水平 1	612.16ab	563.49a	589.55a	864.18a
	水平 2	40.08a	40.59a	38.31a	36.97a		水平 2	722.09a	708.37a	571.10a	440.67b
	水平 3	39.34a	37.30a	41.14a	36.67a		水平 3	533.51b	595.90a	707.11a	562.91b
L/N比	P	0.198	0.047*	0.120	0.010*	L/P 比	P	0.020*	0.062	0.094	0.000*
L/N ratio	水平 1	36.17a	38.82ab	37.65a	41.25b	L/P ratio	水平 1	581.02ab	548.98a	585.25a	807.71c
	水平 2	39.13a	39.81b	36.39a	35.95a		水平 2	697.74 a	685.47a	541.02a	422.93a
	水平 3	38.81a	35.47a	40.07a	36.91a		水平 3	522.43b	566.75a	674.92a	570.55b

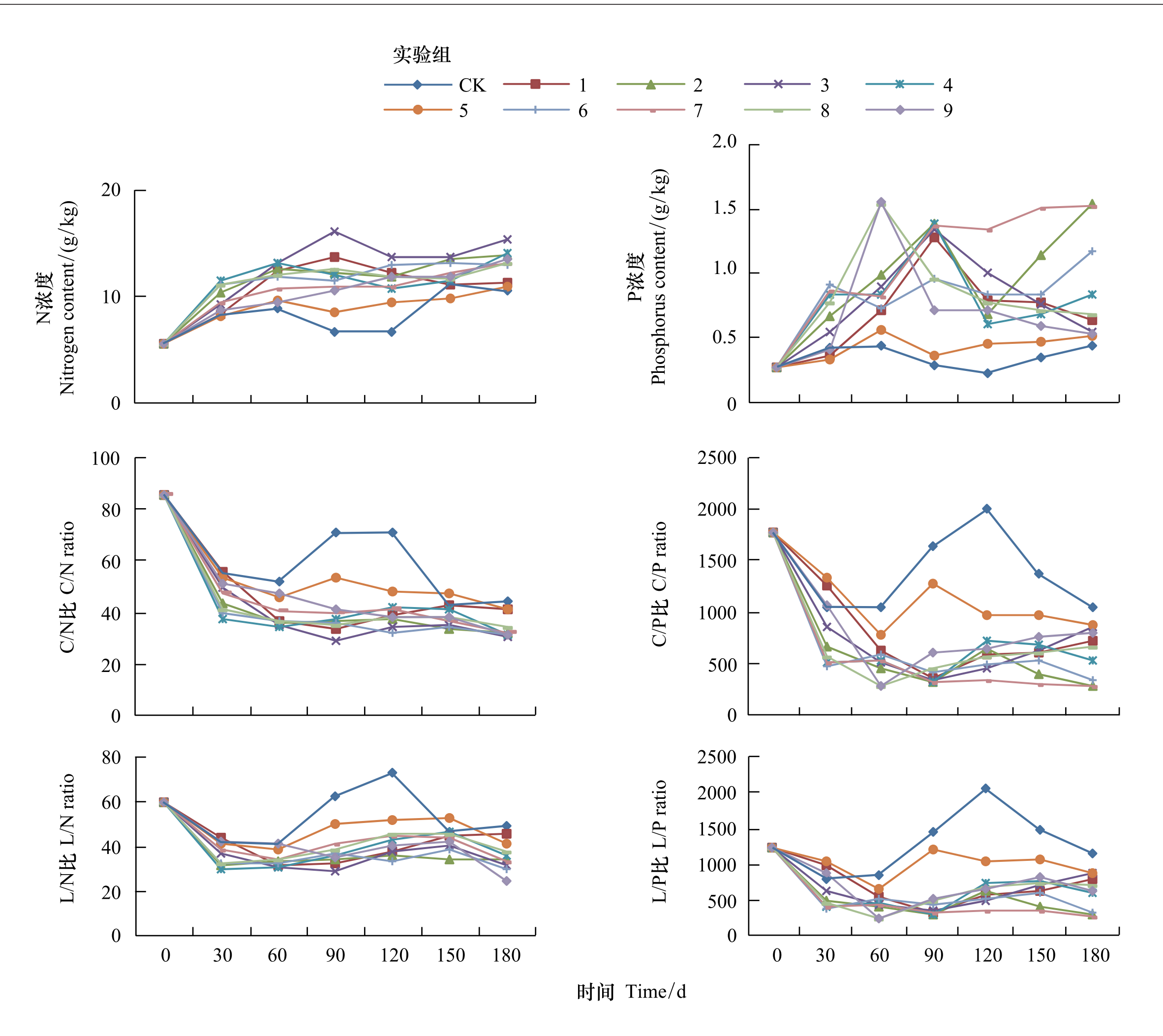


图 2 不同试验组凋落叶质量动态变化

Fig.2 Leaf litter quality dynamics of different trial groups

2.3 凋落叶分解速率与化学质量动态变化的关系

不同试验组凋落叶的质量损失率(y)与剩余凋落叶质量参数(x)线性回归分析结果见表 5。所有组的凋落叶质量损失率均与 N 含量呈正相关,其中第 2、3、4、6、7、9 组达显著水平。第 1、2、3、5、6、7 组的凋落叶质量损失率与 P 含量呈正相关,且第 7 组达显著水平;而其他组与 P 含量呈不显著负相关。所有组凋落叶质量损失率与 C/N 均呈负相关,且第 2、3、4、6、7、9 组相关显著。各组凋落叶质量损失率与 C/P 相关不显著。第 4、6、9 组质量损失率与L/N呈不显著负相关;其他组与L/N呈正相关,且第 2、3 组达显著水平。第 1、2、5、7、9 组质量损失率与 L/P 比呈不显著负相关;其他组与 L/P 比呈正相关,且第 8 组关系显著。

表 5 不同试验组凋落叶的质量损失率与剩余凋落叶化学质量动态的关系

Table 5 The relationships between litter mass loss rate and litter quality on different trial groups

试验号 Test number	统计值 Statistics	剩余凋落叶化学质量参数 Litter chemical quality					
		N 含量 Nitrogen content	P 含量 Phosphorus content	C/N 比 C/N ratio	C/P 比 C/P ratio	L/N 比 L/N ratio	L/P 比 L/P ratio
CK	B	2.322	-27.673	-0.209	0.007	0.255	0.012
	R	0.427	0.239	0.249	0.259	0.309	0.537
	Sig.	0.399	0.648	0.635	0.621	0.552	0.272
1	B	3.151	15.336	-0.798	-0.023	0.075	-0.020
	R	0.633	0.516	0.683	0.765	0.053	0.500

续表

试验号 Test number	统计值 Statistics	剩余凋落叶化学质量参数 Litter chemical quality					
		N 含量 Nitrogen content	P 含量 Phosphorus content	C/N 比 C/N ratio	C/P 比 C/P ratio	L/N 比 L/N ratio	L/P 比 L/P ratio
	Sig.	0.177	0.295	0.135	0.076	0.921	0.312
2	B	75.529*	18.990	−2.425*	−0.041	6.712*	−0.024
	R	0.829	0.60	0.847	0.589	0.816	0.259
	Sig.	0.041	0.208	0.033	0.219	0.048	0.620
3	B	75.529*	9.081	−2.425*	−0.016	6.712*	0.007
	R	0.829	0.293	0.847	0.365	0.816	0.149
	Sig.	0.041	0.573	0.033	0.8477	0.048	0.778
4	B	33.515*	−8.296	−1.107*	0.026	−0.119	0.034
	R	0.827	0.254	0.870	0.427	0.058	0.729
	Sig.	0.042	0.627	0.024	0.398	0.914	0.100
5	B	76.475	37.022	−1.259	−0.013	0.917	−0.008
	R	0.707	0.426	0.555	0.522	0.521	0.217
	Sig.	0.116	0.400	0.253	0.289	0.289	0.680
6	B	12.279*	37.501	−3.587*	−0.055	−0.263	0.001
	R	0.915	0.476	0.913	0.403	0.068	0.009
	Sig.	0.010	0.340	0.011	0.428	0.899	0.981
7	B	9.802*	36.155*	−2.352*	−0.097	0.152	−0.170
	R	0.914	0.846	0.855	0.812	0.054	0.761
	Sig.	0.011	0.034	0.030	0.050	0.919	0.079
8	B	7.229	−16.116	−2.040	0.044	1.434	0.048*
	R	0.504	0.497	0.457	0.568	0.766	0.847
	Sig.	0.308	0.316	0.363	0.239	0.076	0.033
9	B	64.493*	−5.809	−1.598*	−0.004	−1.066	−0.004
	R	0.969	0.204	0.967	0.078	0.612	0.069
	Sig.	0.001	0.698	0.002	0.883	0.196	0.896

3　讨论与结论

3.1　不同调控措施对凋落叶分解速率的影响

凋落物初始化学组成,决定了能否有效地提供微生物群落分解所需的能量和营养,对分解速率影响明显[10]。向养分含量相对不足的凋落物中添加外源营养物质,可提高其初始化学质量,有效补充微生物生长繁殖的营养需求,理论上将有助于凋落物分解。外源物质添加多集中于氮和磷,其对分解速率的影响因凋落物种类、环境条件和处理方式等不同表现各异。如,外加适量氮源能提高杉木凋落物底物质量,促进凋落物分解和养分释放[19];随着氮沉降的增加,北美白桦凋落物分解加快[20];同样的氮添加促进了马尾松松针的分解,却对木荷叶片分解无显著影响[21]。磷添加可以加快 C 的释放,促进凋落物分解[22];氮磷单独添加和复合添加均促进了湿地松凋落叶前期分解速率,抑制中、后期的分解速率[23];养分添加减少了苦槠有机碳保留量,添加 C、N、P 处理影响最大[24]。本研究中,尝试使用富含有机物质和各种营养元素的有机肥料调节马尾松针叶化学质量,有机肥料对凋落叶分解系数影响显著,鸡粪的作用效果较好,说明有机肥料同以往添加的外源营养物质一样,能够改善凋落叶质量,影响其分解速度。

微生物将复杂有机物转化为简单无机物的过程是凋落物分解的重要环节[25],不同的微生物类群适应于不同的化学基质[26],自然条件下分解者的数量和种类决定着枯落物的分解速率[27]。研究表明,人为添加具有一定腐解功能的微生物能够促进凋落物分解,如:速腐增效剂处理显著提高了新疆杨凋落叶分解率[12];添

加微生物菌剂加快了堆腐凋落物的腐熟速度,提高了堆腐凋落物养分浓度[13]。本研究中,菌剂对凋落叶分解系数影响显著,腐解剂 2 的作用表现优于单一真菌(淡紫紫霉)和腐解剂 1,证明根据凋落物中化合物组成特点,添加适宜的功能型复合微生物菌剂,增加有效分解者的数量,可提高凋落物的分解速度。

本研究中,第 7 试验组包含'腐解剂 2'和'鸡粪'两个显著影响分解系数的调控优水平。一方面鸡粪的添加弥补了凋落叶养分的亏缺,提高了凋落叶化学质量,能够满足微生物生长繁殖营养需求;另一方面腐解剂 2 的加入丰富了分解者的种类和数量,二者综合作用更好的促进了凋落叶分解,故该试验组分解参数优于其他。说明根据凋落物特性,选择多种调控手段协同作用是加速马尾松林下凋落物分解转化的有效途径。

3.2 不同调控措施对凋落叶质量参数变化的影响

在凋落物分解过程中,非有机态营养元素的释放是在碳与营养元素比低于一定值后才发生。如果分解开始就超过此值,那么元素就会滞留直至低于最小值为止[28]。本研究中,马尾松凋落叶初始 C/N(85.37)和 C/P(1774.6)较高,故在林下自然分解过程中(CK),N、P 两种元素含量总体呈升高趋势,这与以往马尾松凋落叶分解的研究结果相一致[29];C/N、C/P、L/N和 L/P 则大体呈降低态势,说明自然分解过程中,剩余凋落叶质量参数动态向着有利于营养元素释放的方向变化。各调控组质量参数的动态变化规律与 CK 相近,但变化幅度明显高于 CK,说明人为调控因素提高了剩余凋落叶化学质量的变化进程,利于凋落物分解的进行。各调控因素作用特点不同,其对质量参数变化的影响存在差异。有机肥料富含 N、P 等营养元素,所以添加有机肥料有利于剩余凋落叶 N、P 含量升高,C/N、C/P、L/N和 L/P 的降低,提高剩余凋落叶化学质量作用明显,与以往通过养分添加影响凋落物分解的研究结果基本一致[19,24]。微生物生长繁殖需要消耗大量的碳,有机碳又是凋落叶的主要组分,故微生物将分解凋落叶中有机碳。以往研究也证明向凋落叶中添加菌剂后,提高了凋落叶 C 的分解速率,降低了 C/N[12-13]。本研究中菌剂显著影响剩余凋落物的 C/P 和 L/P,对 C/N 影响不显著,可能是菌剂与其他调控因素联合作用所致。表面活性剂 OP-10 有利于凋落叶L/N的降低,可能是因为表面活性剂具有的软化蜡质的功效,使植物茎叶表面的第一道屏障得以不同程度的改变[30],经表面活性剂处理后的凋落叶便于微生物着生,利于分解。

3.3 凋落叶化学质量动态变化对分解速率的影响

凋落物基质质量与其分解速率密切相关,以往多集中于凋落物分解速率与初始化学质量关系的研究。随着凋落物分解的进行,其化学质量也随之改变。上一阶段的分解产物即为下一份阶级的分解底物,上一阶段剩余凋落物的化学质量必然影响下一阶段凋落物的分解速率,故探讨分解过程中凋落物化学质量动态与分解速率变化的关系,更能真实反映凋落物化学质量对分解过程的影响。葛晓改等[31]研究自然分解条件下,马尾松凋落叶化学性状动态变化与分解速率关系发现,凋落叶分解速率与 N 动态呈极显著正相关关系,与 P 和 C/N 动态呈极显著负相关关系,与 C/P 动态呈正相关关系,但不显著。由于试验材料、研究地点和试验周期等因素的不同,本研究自然分解状态下(CK)马尾松松针分解速率与化学质量动态也呈现相似的关系,但相关性均不显著。6 个调控组(2、3、4、6、7、9) 质量损失率与凋落叶 N 动态呈显著正相关关系,与 C/N 动态呈显著负相关关系。这一结果主要是因为人工调控因素显著影响了分解过程中凋落叶 N 含量和 C/N,所以相比于自然分解,调控因素也提高了二者对分解速率的影响。N 含量和 C/N 是影响人工调控试验分解速率的主要因素,分解过程中剩余凋落物 N 浓度越高和 C/N 比越低,越利于分解。凋落叶质量损失率与 P 浓度、L/N、C/P 和 L/P 动态的关系则不规律或不显著,说明以上 4 个参数不是调控试验分解速率的主要影响因素。

综上所述,根据凋落叶特性,选择不同调控因素改变分解条件,能够影响凋落叶分解速率,多因素协同作用效果好;调控因素的加入能够促进质量参数向着利于分解的方向变化;调控因素可通过改变凋落物化学质量影响其分解速率,N 含量和 C/N 是影响人工措施调控凋落物分解的主要因素。本研究是采用多因素协同调控马尾松凋落叶分解的尝试,仍需开展后续试验来检验本研究结果。通过扩大调控因素数量、增加试验重复次数,建立野外固定样地等,将更为深入的研究人工调控马尾凋落叶分解的途径和机制。

参考文献(References):

[1] Facelli J M, Pickett S T A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure. The Botanical Review, 1991, 57(1): 1-32.

[2] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 曹裕松. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. 生态学杂志, 2004, 23(6): 77-83.

[3] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems. Environmental Reviews, 1997, 5(1): 1-25.

[4] Bates J D, Svejcar T S, Miller R F. Litter decomposition in cut and uncut western juniper woodlands. Journal of Arid Environments, 2007, 70(2): 222-236.

[5] 王瑾, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较. 植物生态学报, 2001, 25(3): 375-380.

[6] Berg B, Johansson M B, Meentemeyer V. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(7): 1136-1147.

[7] 美丽班·马木提. 氮磷添加对天童木荷凋落叶分解的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.

[8] 于雯超, 宋晓龙, 修伟明, 张贵龙, 赵建宁, 杨殿林. 氮素添加对贝加尔针茅草原凋落物分解的影响. 草业学报, 2014, 23(5): 49-60.

[9] 弓晓静. 中亚热带四种树种凋落叶分解对碳氮磷调控的响应[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.

[10] 林淑伟. 珍贵树种针叶分解对外源物质的响应及其机制的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.

[11] 郝杰杰, 宋福强, 田兴军, 黄丰, 张鹏, 张智俊. 几株半知菌对马尾松落叶的分解——木质纤维素酶的活性动力学. 林业科学, 2006, 42(11): 69-75.

[12] 王雷涛, 郑路, 尹林克, 胡秀琴, 李燕红, 刘艳丽. 覆土及微生物菌剂对荒漠区人工林凋落叶分解及养分动态的影响. 干旱区研究, 2010, 27(5): 726-733.

[13] 郑路, 尹林克, 姜逢清, 胡秀琴, 李燕红, 邱文成. 微生物菌剂对干旱区城市防护绿地凋落物分解的影响. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2267-2272.

[14] Gnankambary Z, Bayala J, Malmer A, Nyberg G, Hien V. Decomposition and nutrient release from mixed plant litters of contrasting quality in an agroforestry parkland in the south-Sudanese zone of West Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 82(1): 1-13.

[15] Li W, Pan K W, Wu N, Wang J C, Han C M, Liang X L. Effects of mixing pine and broadleaved tree/shrub litter on decomposition and N dynamics in laboratory microcosms. Ecological Research, 2009, 24(4): 761-769.

[16] 王意锟, 方升佐, 曲宏辉, 唐罗忠, 宋浩. 森林凋落物分解的影响因素. 林业科技开发, 2012, 26(1): 5-9.

[17] Van Soest P J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. 2. A rapid method for the determination of fiber and lignin. Journal of the Association of Official Agricultural Chemists, 1963, 46(5): 829-835.

[18] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology, 1963, 44(2): 322-331.

[19] 项文化, 闫文德, 田大伦, 雷丕锋, 方晰. 外加氮源及与林下植物叶混合对杉木林针叶分解和养分释放的影响. 林业科学, 2005, 41(6): 1-6.

[20] Hobbie S E, Gough L. Litter decomposition in moist acidic and non-acidic tundra with different glacial histories. Oecologia, 2004, 140(1): 113-124.

[21] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1413-1420.

[22] Qualls R G, Richardson C J. Phosphorus enrichment affects litter decomposition, immobilization, and soil microbial phosphorus in wetland mesocosms. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 799-808.

[23] 弓晓静, 余明泉, 胡小飞, 郭恢财, 陈伏生. 氮磷添加对红壤区城郊湿地松林凋落叶分解的影响. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2327-2333.

[24] Chen F S, Feng X, Liang C. Endogenous versus exogenous nutrient affects C, N, and P dynamics in decomposing litters in mid-subtropical forests of China. Ecological Research, 2012, 27(5): 923-932.

[25] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. 林业科学, 2006, 42(4): 93-100.

[26] 严海元, 辜夕容, 申鸿. 森林凋落物的微生物分解. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1827-1835.

[27] Gessner M O, Swan C M, Dang C K, Mckie B G, Bardgett R D, Wall D H, Hättenschwiler S. Diversity meets decomposition. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(6): 372-380.

[28] Mcclaugherty C A, Pastor J, Aber J D, Melillo J M. Forest litter decomposition in relation to soil nitrogen dynamics and litter quality. Ecology, 1985, 66(1): 266-275.

[29] 杨细明. 马尾松人工林凋落物分解及养分释放规律. 福建林学院学报, 2002, 22(1): 86-89.

[30] 李晓莉, 岳彩鹏, 王冰, 沙琰琰, 苏良, 史团省. 表面活性剂对大豆和花生茎叶吸硼量的影响. 贵州农业科学, 2011, 39(7): 107-111.

[31] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 肖文发, 黄志霖, 周本智. 三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系. 生态学报, 2015, 35(3): 779-787.